

DEAS를 이용한 변압기 코아의 최적설계

김종욱, 차상윤, 김재관
포스코 기술연구소 전기강판연구그룹

Optimal Design of Transformer Cores Using DEAS

Jong-Wook Kim, Sang Yun Cha, Jae Kwan Kim
Electrical Steel Sheet Research Group, Technical Research Laboratories, POSCO

Abstract - This paper introduces an optimal design technique for a 250-watt isolation transformer using a recently developed optimization method, dynamic encoding algorithm for searches(DEAS). Although the optimal design technique for transformers dates back to 1970s and local optimization is often undertaken using FEM nowadays, literature concerning global optimization of transformer cores is rarely found against its importance. In this paper, a small isolation transformer is used as a model to be optimized with application of DEAS to corresponding mathematical description. The optimization result confirms that DEAS can be successfully employed to design transformer cores for various design specifications only by changing cost functions.

1. 서 론

전력 사용량의 지속적인 증가로 발전용과 배전용 변압기의 수요가 계속 증가하고 있으며, 각종 전기회로에서 사용되는 소형 변압기 또한 그 수요가 꾸준히 증가하고 있지만, 변압기 코아의 최적설계에 관한 연구는 전세계적으로도 매우 드물다고 할 수 있다. 특히 환경과 건강에 대한 관심이 날로 커져가고 있는 국내 상황에서 변압기의 고효율화와 저소음화는 이제 변압기 설계의 중요한 목표로 자리잡아가고 있다. 하지만 변압기 고효율화를 위해서는 일반적으로 설계 자속밀도 값을 높여야 하고, 저소음화를 위해서는 설계 자속밀도 값을 낮춰야 하는 상반성이 있다. 아울러 변압기의 원재료 가격 상승으로 제작비용을 최소화하는 것도 중요하게 고려되어야 한다. 이는 변압기의 설계가 여러 가지 목적들을 동시에 만족시켜야 하는 multi-objective optimization을 필요로 함을 의미하며, 이를 위해 설계자의 직관과 경험보다는 수치 최적화법을 사용하는 것이 유리하다.

DEAS는 저자가 개발한 최적화법으로서, 이진 스트링의 독특한 특성을 수치 최적화에 적용함으로써 순수한 컴퓨터 연산만으로도 부드럽지 않은 비용함수에 대해서 최적해를 효율적으로 찾을 수 있음을 보였다[1][2]. DEAS는 이진 행렬로 표현되는 농동적인 이웃 구성원들(neighborhood) 가운데에서 최선의 것을 선택하는 방식으로 파라미터들을 점진적으로 최적화한다. 그리고 전역 최적화를 위해 랜덤한 초기 값으로부터 지역최적화를 수행한 후 만족한 해를 찾지 못했다면 새로운 초기 값으로부터 새시작하게 하는 multistart 기법을 활용했다.

본 논문에서는 McLyman의 교재[3]에서 소개된 250W급의 분리변압기(isolation transformer)의 설계 원리를 소개하고, 교재에서 도출한 최적 값과 DEAS를 이용한 최적 값을 비교하기 위해 설계 사양과 원재료의 선택은 교재의 것과 동일하게 설정했다. 변압기의 기본 동작원

리는 동일하므로 본 논문에서 제안된 방법은 실제의 전력/배전용 변압기에도 적용 가능하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 250W 분리변압기의 온도 상승 한도를 30°C로 하고, 변압기의 손실을 줄임으로써 효율을 극대화하고, window utilization을 최대한 0.4에 적중하게 하는 변압기를 설계하는 것을 목표로 한다.

2. 본 론

2.1 250 Watt 분리변압기 설계 순서

다음은 본 논문에서 최적화할 대상으로 선정한 250W 분리변압기의 설계요건과 설계방법을 나타내며 비교를 위해 [3]의 값과 수식들을 인용했다.

1. 입력 전압, $V_m = 115V$
2. 출력 전압, $V_o = 115V$
3. 출력 전류, $I_o = 2.17A$
4. 출력 전력, $P_o = 250W$
5. 주파수, $f = 47Hz$
6. 효율, $\eta = 95\%$
7. 전압변동값, $\alpha = 5\%$
8. 설계 자속밀도, $B_{ac} = 1.6T$
9. 코아 재질 = 방향성 전기강판 MGX
10. Window utilization, $K_u = 0.4$
11. 목표 상승온도, $T_r = 30^\circ C$

상기 설계 사양에서 입출력 전압, 주파수, 설계 자속밀도, 코아 재질은 결정된 값이며, 효율과 전압변동값, Window utilization, 목표 상승온도 등은 설계 과정에서 반복적으로 계산되어져야 하는 값들이다. 그러므로 보다 정밀한 변압기 특성 모사를 위해서는 적어도 몇 회의 반복계산이 필요하며, 본 논문에서는 각 10회를 반복하도록 했다.

다음은 변압기 설계 단계를 나타낸다[3].

Step 1. 변압기 피상전력(P_t) 계산

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) = 513[W] \quad (1)$$

Step 2. 전기적 조건(electrical condition) 계산

$$K_e = 0.145 (K_f)^2 f^2 (B_m)^2 10^{-4} = 1.62, \quad K_f = 4.44 \text{ (sine wave)} \quad (2)$$

Step 3. 코어 형상(K_g) 계산

$$K_g = \left(\frac{P_t}{2K_e \alpha} \right) = 31.7 [cm^5] \quad (3)$$

McLyman은 K_g 를 코아 재질 및 형상의 대표값으로 정하고 식 (3)에서 대략적으로 구한 코아 형상값인 31.7에 가장 가까운 EI 형태 코아로서 EI-150을 선택했으며 그에 해당되는 사양은 다음과 같다.

Step 4. 코아 단판의 재질을 선택

단판 재질 = EI-150

Magnetic Path Length, MPL = 22.9cm

Mean Length Turn, MLT = 22cm

코아 단면적, $A_c = 13.8\text{cm}^2$

코아 창면적, $W_a = 10.89\text{cm}^2$

코아 중량, $W_{fe} = 7.3856(MPL)A_c = 2.334 \text{ Kg}$

면적곱(area product), $A_p = A_c W_a = 150\text{cm}^4$

코아 형상 계수, $K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} = 37.6\text{cm}^5$

표면 면적, $A_t = 39.11(A_p)^{0.5} = 479\text{cm}^2$

Step 5. Faraday의 법칙을 이용해서 1차 권선수 계산

$$N_p = \frac{V_{in}(10^4)}{K_o B_{ac} f A_c} = 250 \quad [\text{Turns}] \quad (4)$$

Step 6. 전류밀도 J 를 계산

$$J = \frac{P_o(10^4)}{K_o K_u B_{ac} f A_p} = 256 \quad [\text{A/cm}^2] \quad (5)$$

Step 7. 입력전류 I_{in} 을 계산

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in}\eta} = 2.28 \quad [\text{A}] \quad (6)$$

Step 8. 1차 나권선(bare wire)면적 $A_{wp(B)}$ 계산

$$A_{wp(B)} = \frac{I_{in}}{J} = 0.0089 \quad [\text{cm}^2] \quad (7)$$

Step 9. 권선표로부터 1차 권선 선택

AWG = #18,

$A_{wp(B)}' = 0.00822[\text{cm}^2]$

$\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right) = 209 \text{ [micro-ohm/cm]}$

위의 값은 Step 8에서 계산에 의해 구한 $0.0089[\text{cm}^2]$ 와 가장 근사한 값을 표 1에서 선택함으로써 얻을 수 있으며 DEAS로 탐색시에도 같은 방법이 적용된다.

Step 10. 1차 권선 저항 계산

$$R_p = MLT(N_p) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10^{-6}) = 1.15 \quad [\text{ohms}] \quad (8)$$

Step 11. 1차 동손(P_p) 계산

$$I_p = A_{wp(B)}' J \quad (9)$$

$$P_p = I_p^2 R_p = 5.98 \quad [\text{W}] \quad (10)$$

식 (9)는 Step 9에서 선택된 권선의 단면적 변화에 따라 일차 권선에 흐르는 전류변화 보정을 위한 식이다.

Step 12. 2차 권선수 계산

$$N_s = \frac{N_p V_s}{V_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) = 262.5 \rightarrow 263 \quad [\text{Turns}] \quad (11)$$

Step 13. 2차 나권선(bare wire)면적 $A_{ws(B)}$ 계산

$$A_{ws(B)} = \frac{I_o}{J} = 0.00804 \quad [\text{cm}^2] \quad (12)$$

Step 14. 권선표로부터 2차 권선 선택

AWG = #18,

$A_{ws(B)}' = 0.00822 \text{ [cm}^2]$

$\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right) = 209 \text{ [micro-ohm/cm]}$

Step 15. 2차 권선 저항 계산

$$R_s = MLT(N_s) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10^{-6}) = 1.21 \quad [\text{ohms}] \quad (13)$$

Step 16. 2차 동손(P_s) 계산

$$I_s = A_{ws(B)}' J \quad (14)$$

$$P_s = I_s^2 R_s = 5.70 \quad [\text{W}] \quad (15)$$

Step 17. 1차와 2차 동손의 합 계산

표 1. 권선 특성표

AWG	Bare Area $\text{cm}^2(10^{-3})$	Resistance $(\mu\Omega/\text{cm}, 20^\circ\text{C})$	Area $\text{cm}^2(10^{-3})$
14	20.820	82.8	22.95
15	16.510	104.3	18.37
16	13.070	131.8	14.73
17	10.390	165.8	11.68
18	8.228	209.5	9.326
19	6.531	263.9	7.539
20	5.188	332.3	6.065
21	4.116	418.9	4.837
22	3.243	531.4	3.857

$$P_{cu} = P_p + P_s = 11.68 \quad [\text{W}] \quad (16)$$

Step 18. 전압변동률 α 계산

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100) = 4.67 \quad [\%] \quad (17)$$

Step 19. 전기강판 손실 계산

$$W/K = 0.000557(f^{1.68}(B_{ac})^{1.86}) = 0.860 \quad [\text{W}] \quad (18)$$

Step 20. 코아 손실 계산

$$P_{fe} = (W/K)(W_{fe})(10^{-3}) = 2.00 \quad [\text{W}] \quad (19)$$

Step 21. 총손실 계산

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} = 13.68 \quad [\text{W}] \quad (20)$$

Step 22. 단위면적당 총손실 계산

$$\phi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} = 0.0286 \quad [\text{W}/\text{cm}^2] \quad (21)$$

Step 23. 온도 증가 계산

$$T_r = 450\phi^{0.826} = 23.9 \quad [^\circ\text{C}] \quad (22)$$

Step 24. Window utilization K_u 계산

$$K_u = K_{wp} + K_{ws} = 0.388 \quad (23)$$

$$K_{wp} = \frac{N_p A_{wp(B)}}{W_a}, \quad K_{ws} = \frac{N_s A_{ws(B)}}{W_a} \quad (24)$$

본 논문에서는 최적화를 위해 변화시킬 수 있는 네 가지 인자로서 MPL, MLT, 코아 단면적 A_c 와 코아 창면적 W_a 를 선택했다.

코아의 설계 성능지표로는 효율, 온도 상승, 전압변동률, window utilization이며 효율은 끌수록 좋고, 온도 상승과 전압 변동률, window utilization은 지정된 값에 최대한 근접할 수록 좋다. 그러므로 DEAS를 이용해서 최소화해야 할 목적함수는 다음과 같이 정할 수 있다.

$$J = \beta_1(1-\eta) + \beta_2 \frac{|T_r - 30|}{30} + \beta_3 \frac{|\alpha - 5|}{5} + \beta_4 \frac{|K_u - 0.4|}{0.4} \quad (25)$$

식 (25)에서 β_1 에서 β_4 는 가중치로서 설계자의 설계 목적에 따라 가장 중요한 항이 목적함수에 미치는 영향을 최대화하기 위해 조정되는 값들이다. 예를 들어, 효율이 가장 중요하

다면 β_1 을, 전압 변동률을 정확하게 5%로 맞추고 싶다면 β_3 를 다른 가중치보다 크게 정하면 된다. 식 (25)는 설계자의 필요에 따라 새로운 항을 임의대로 추가하거나 변형시킬 수 있는데 그 이유는 DEAS가 여타 gradient법과는 달리 목적함수의 편미분 정보를 사용하지 않기 때문이다. 이는 직접 최적화 법의 큰 장점이기도 하다[4].

2.2 DEAS

DEAS는 크게 지역최적화와 전역최적화 단계로 나눌 수 있으며, 지역최적화는 다시 BSS(Bisectional Search)와 UDS(Unidirectional Search)로 나눌 수 있다. BSS는 이진수로 구성된 임의의 스트링의 LSB(least significant bit)에 0(1)을 붙이고 일정 범위내에서 복호화

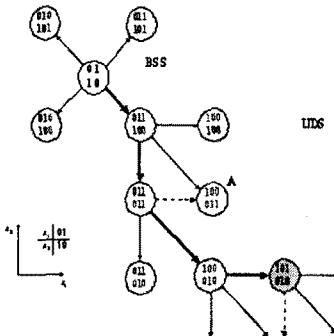


그림 1. 2차원에서의 DEAS 지역최적화 예시

(decoding)하면 이전 스트링을 복호화한 값보다 감소(증가)하는 성질을 이용해서, 계속해서 이진수를 이전의 최적 이진 스트링에 붙이면서 exploitation을 수행한다. 이는 gradient 법에서 탐색이 진행될수록 step length가 감소하면서 fine search를 행하는 효과를 갖게 한다 그러나, BSS 수행시 이전 트리의 구조상 탐색에 한계가 있으므로 이를 보완하기 위해 UDS가 고안되었다. 즉, BSS에서 찾아진 최적 탐색 방향에 대해 이전 스트링의 increment addition이나 decrement subtraction을 수행하는 것이다. BSS는 주어진 길이의 스트링에 대해 한번만 수행되며 UDS는 목적함수 값이 최소가 될 때까지 수행된다. 그림 1은 2차원에서 BSS와 UDS를 이용한 DEAS의 지역최적화 과정을 나타내며 굵은 선으로 표시된 것이 각 탐색 neignborhood 중 비용이 최소인 탐색방향임을 나타낸다. 전역 최적화법은 multistart 기법을 활용했는데 그에 대한 설명은 생략하기로 한다.

2.3 최적화 결과

다음은 최적 설계를 위해 DEAS 실행시 설정해 주는 내부 파라미터를 나타낸다.

- DEAS type : eDEAS
- Search type : preliminary search
- maxInitRowLen = 3, optInitRowLen = 3,
maxRowLen = 10
- lowBnd=[15 15 9 5], upBnd=[35 35 20 20]
- $\beta_1 = 20$, $\beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 1$ in (25)

위에서 lowBnd와 upBnd는 최적화대상인 MPL, MLT, Ac, Wa 탐색범위의 최소, 최대값을 나타낸다. 효율적인 탐색을 위해서는 기존의 최적값을 참고해서 탐색범위를 적절하게 설정하는 것이 중요하다.

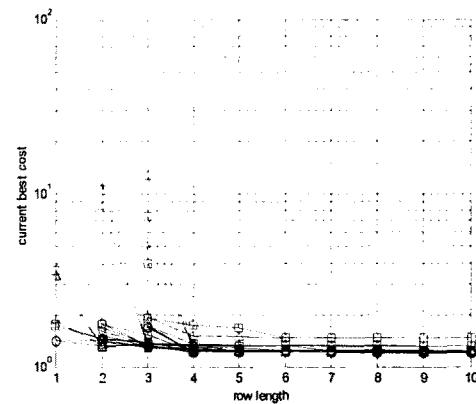
그림 2는 위에서 설정한 내부 파라미터로 DEAS를 실

행했을 때 목적함수의 값들이 최소화되는 과정을 보인다. 그리고 이를 통해 얻어진 최적 설계값 및 변압기 성능값들은 다음과 같다.

- MPL=15.02, MLT=21.14, Ac=10.60, Wa=19.37
- $\eta = 0.9572$, $\alpha=4.9976$, $T_r=23.6069$, $K_u=0.4534$
- 목적함수 값 = 0.7746

비교를 위해 [3]에서 제시된 최적 설계값과 성능값들을 나타내면 다음과 같다.

- MPL=22.90, MLT=22.00, Ac=13.80, Wa=10.89



- $\eta = 0.9479$, $\alpha=4.9144$, $T_r=24.7405$, $K_u=0.4393$
- 목적함수 값 = 2.9479

그림 2. DEAS를 이용한 목적함수 값 최소화

위의 값들을 비교했을 때, 제안된 최적설계 방법 사용시 약 1%의 효율 증가를 얻을 수 있으며, 전압변동률을 목표한 대로 5%에 적중할 수 있고, 목표 상승온도와 window utilization도 목표값에 최대한 근접함을 알 수 있다. 제안된 설계법의 장점은 목적함수식 (25)의 가중치와 항들을 미분가능성과 관련없이 자유롭게 변형 및 조절함으로써 설계 자유도를 높일 수 있고, DEAS의 고속최적화 성능으로 인해 짧은 시간 내에 원하는 설계값을 얻을 수 있다는 점이다.

3. 결 론

변압기의 최적설계기법은 변압기의 오랜 역사와 전력 기반에 미치는 심대한 중요성에도 불구하고, 지금까지 국내외적으로 활발히 연구되지 못하였다. 본 논문에서는 모델 변압기로서 250W급의 분리변압기에 대해 변압기 설계의 권위자인 McLyman[3]의 설계방법에 대해 저자가 개발한 최적화법인 DEAS를 적용해서 최적설계를 수행했으며, 그 결과 개선된 변압기 성능값을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법은 변압기 설계시 각 단계가 수식이나 커브, 신경망 등 종류와는 상관없이 모델링 되어 있기만 하면 적용 가능하므로 향후 POSCO 방향성 전기강판 고객사에 대해 적극적으로 최적설계 지원을 행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jong-Wook Kim and Sang Woo Kim, "A numerical method for global optimization: dynamic encoding

- algorithm for searches," *IEE Proc.-Control Theory and Appl.*, vol. 151, no. 5, pp. 661-668. Sept. 2004.
- [2] Jong-Wook Kim and Sang Woo Kim, "Parameter identification of induction motors using dynamic encoding algorithm for searches (DEAS)," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 16-24, March 2005.
- [3] Colonel W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, Marcel Dekker, Inc. 2004.
- [4] S. S. Rao, *Engineering Optimization*, John Wiley & Sons Inc., 1996.